

УДК: 681.3(075.8)

## **Использование системы компьютерного моделирования matlab при проектировании датчика давления**

К. П. Никонов, В.П. Орлов

Представлена методика проектирования датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем с использованием системы компьютерного моделирования MATLAB. Предложены маршрут проектирования и типовые проектные процедуры для класса датчиков давления: имитационное моделирование в среде MATLAB, разработка схемы электрической принципиальной и печатной платы датчика давления методом сквозного проектирования в САПР Mentor Graphics, разработка конструкции и проведение поверочных расчетов в среде Solid Works. Для исследования метрологических характеристик дифференциально-емкостного первичного преобразователя давления и проверки адекватности разработанной модели был изготовлен макет датчика давления.

Ключевые слова: методика проектирования датчика давления; маршрут проектирования; имитационное моделирование в среде MATLAB; типовые проектные процедуры в САПР Mentor Graphics; Solid Works.

В информационно – управляющих системах, используемых при испытаниях и эксплуатации изделий авиационной и космической техники, в ряду измеряемых физических параметров доля параметра «давление» занимает 40 – 60% от их общего числа. По этой причине задача проектирования нового или модернизации существующего датчика давления встречается достаточно часто. Необходимость проведения большого объема математических расчетов, разработки и макетирования на печатной плате схемы электрической принципиальной, расчета вариантов исполнения конструкции корпуса для заданных условий эксплуатации подразумевает привлечение ECAD, MCAD систем и организации их взаимодействия. Задачу проектирования в заданных рамках можно решить двумя способами. Первый – используя типовые средства САПР, разработать макет датчика давления с необходимым первичным преобразователем, провести испытания и обработать полученные результаты. Достоинства данного способа: достоверный результат с требуемой точностью. Недостатки: дороговизна, требуется наличие сложного оборудования, длительное время разработки макета и проведения эксперимента. Второй способ - компьютерное моделирование. В этом случае возможно существенное сокращение временных затрат на проектирование за счет определенной свободы выбора параметров моделирования и

сокращения временных затрат на проведение эксперимента. Недостатки: модель разрабатывается с определенными допущениями, необходимо подтвердить ее адекватность, точность результатов моделирования определяется степенью детализации модели.

На базе второго способа обеспечивающего, по мнению авторов, определенный выигрыш по времени, предлагается следующий маршрут проектирования. Он включает три этапа: разработку модели и имитационное моделирование в среде MATLAB, разработку схемы электрической принципиальной и печатной платы датчика давления методом сквозного проектирования в САПР Mentor Graphics или подобной, разработку конструкции и проведение поверочных расчетов в среде Solid Works. На первом этапе необходимо выбрать тип и провести исследование характеристик первичного преобразователя давления, так как он в наибольшей степени подвержен воздействию неблагоприятных факторов и окружающей среды, предложить имитационную модель для аналоговой и цифровой части электроники, предусмотреть цепи коррекции для обеспечения стабильности метрологических характеристик [1]. Целью данного этапа является расчет, моделирование вариантов статической и динамической характеристик датчика, при условии минимальной погрешности в заданном диапазоне измерений. Расчет как правило осуществляется методом наименьших модулей или методом наименьших квадратов. По результатам определяется наилучшая аппроксимирующая прямая - прямая наименьших модулей (прямая наименьших квадратов) и оценивается степень её совпадения с вариантом графика статической характеристики.

В основу модели положена методика расчета параметров статической характеристики методом равномерного приближения[4], реализованная в среде компьютерного моделирования MATLAB. Её содержание рассмотрим с использованием примера, приведенного на рисунке 1.

1. Задаётся диапазон измерения  $x_B - x_H$ , общий вид уравнения аппроксимирующей прямой  $y_a = A + B \cdot x$  и значение погрешности.

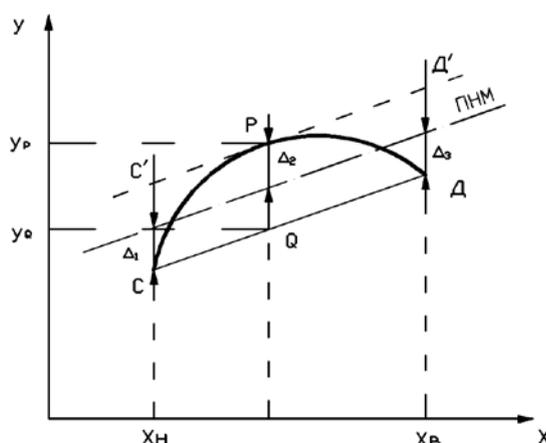


Рисунок 1. К содержанию методики расчета методом равномерного приближения

2. Определяется значение абсолютной погрешности от нелинейности статической характеристики  $\Delta_H$

$$\Delta_H = \Delta_H(x) = f(x) - (A + B \cdot x) \quad (1)$$

3. Из условия минимальной величины модуля максимальной погрешности  $\Delta_{HM}$  вычисляются коэффициенты А и В аппроксимирующей прямой.

$$\Delta_{HM} = \max|f(x) - (A + B \cdot x)| = \min, \quad (2)$$

что равносильно условию равномерного приближения

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \dots = \Delta_n = \Delta_{HM}, \text{ тогда} \quad (3)$$

$$p_k = (d\Delta_H(x)/dx) \Big|_{x=x_k} = 0, \quad (4)$$

где  $\Delta_j$  ( $j=1,2\dots n$ ) - экстремальные значения модуля абсолютной погрешности (1),(2);

$p_k$  - производная функции  $\Delta_H(x)$  при  $x = x_k$ ;

$x_k$  ( $k=1,2\dots m$ ) - абсциссы точек экстремумов функции  $\Delta_H(x)$ .

Задавая значения отклонений  $\Delta_j$  и производных  $p_k$  через коэффициенты А, В и  $x_k$ ,

используя полученную систему уравнений определяем коэффициенты прямой равномерного приближения (прямой наименьших модулей).

В качестве первичного преобразователя разрабатываемого датчика использована емкостная ячейка фирмы VCMSensor модель 315M-DP. Для пояснения принципа действия ячейки и особенностей, на рисунке 2 показана конструкция дифференциально-емкостного преобразователя давления.

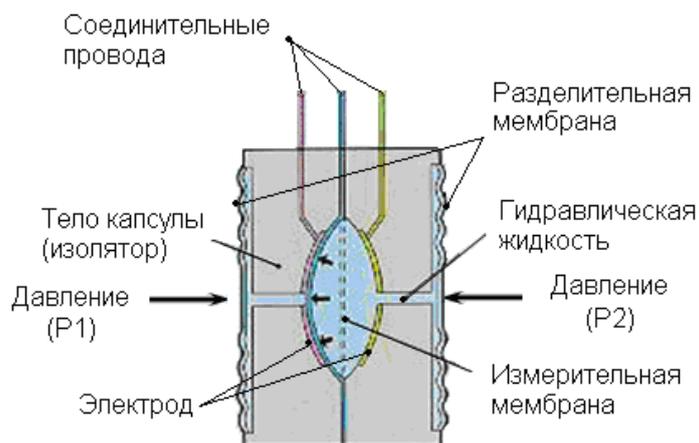


Рисунок 2. Конструкции дифференциально-емкостного первичного преобразователя давления фирмы VCMSensor модель 315M-DP.

Принцип работы преобразователя: измеряемые значения давления P1 и P2 воздействуют на разделительные мембраны и через гидравлическую жидкость разность передается на измерительную (чувствительную) мембрану. Чувствительная мембрана прогибается на расстояние  $\Delta X$ , пропорционально разности давлений, изменяется значение емкости между

чувствительной мембраной и электродами. Информативным сигналом является изменение емкости  $\Delta C$ .

Дополнительно, для обеспечения температурной компенсации в емкостной ячейке 315M-DP используется внутренний температурный сенсор, конструктивно выполненный в виде диода.

На рисунке 3 представлена структурная схема модели емкостной ячейки. Для разработки имитационной модели емкостной ячейки необходимо разделить преобразователь на звенья, каждое из которых выполняет отдельную функцию. Каждое звено описывается соответствующими аналитическими выражениями. Связи между звеньями реализуются в удобной для построения модели форме [4].

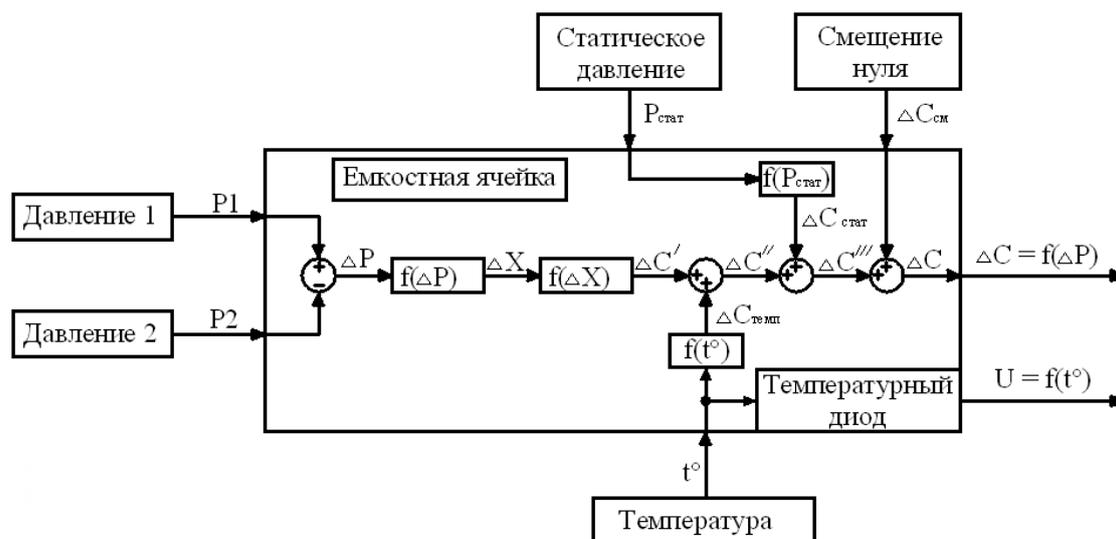


Рисунок 3. Структурная схема модели емкостной ячейки

В документации на емкостную ячейку 315M-DP [7] приведён диапазон измерения (ranges): 0 - 1,5 кПа, ..., 0-6,89 МПа. Модель ёмкостной ячейки реализована средствами Simulink. Ячейка является дифференциальным преобразователем и имеет возможность измерять абсолютное давление, давление разряжения, разность давлений, соответственно имеет два измерительных канала.

Для ёмкостной ячейки перемещение мембраны под воздействием давления в первом приближении равно:

$$\Delta X = f(\Delta P) = K_x \cdot (P_1 - P_2), \quad (5)$$

где  $K_x$  - коэффициент пропорциональности, выбираемый в зависимости от размеров и материала мембраны.

В дифференциально-ёмкостных преобразователях максимальное перемещение мембраны изменяется от 1мкм до 100мкм (зависит от модели). При столь малых перемещениях можно принять линейную зависимость для  $\Delta C'$  [5,6]:

$$\Delta C' = f(\Delta X) = K_c \cdot \Delta X, \quad (6)$$

где  $K_c$ - коэффициент пропорциональности, зависящий от площади мембраны, расстояния между неподвижными обкладками конденсаторов, диэлектрической проницаемости среды, находящейся между обкладками.

Рабочее окно разработанной модели дифференциально-емкостного преобразователя давления в среде MATLAB представлено на рисунке 4.

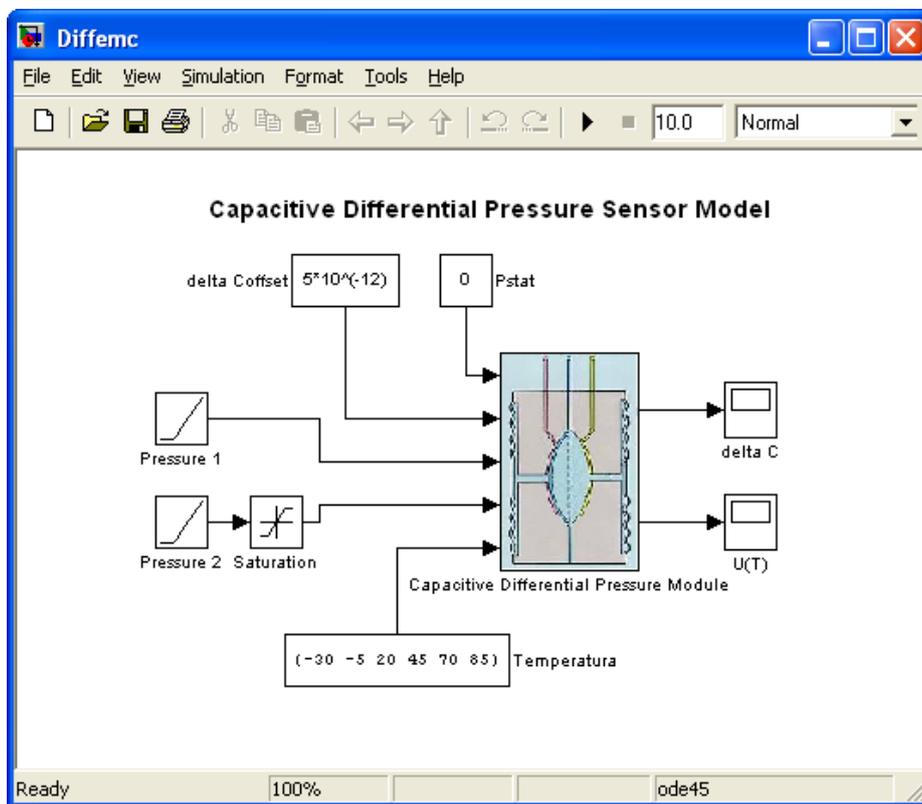


Рисунок 4. Рабочее окно разработанной модели дифференциально-емкостного преобразователя давления

Выходной сигнал  $\Delta C$  емкостной ячейки 315M-DP изменяется в пределах  $\pm 100$  пФ [7]. Для оценки и компенсации влияния изменения температуры окружающей среды на линейность статической характеристики в модель добавлена функция  $f(t^\circ)$ . Эта функция характеризует дополнительную температурную погрешность  $\Delta C_{\text{тем}}$  выходного сигнала. По данным производителя использованной емкостной ячейки, дополнительная температурная погрешность не превышает  $0,009\%$  верхнего предела диапазона измерения (ВПИ)/ $^\circ\text{C}$ . Тогда:

$$\Delta C_{\text{тем}} = f(t^\circ) = \pm \left( \frac{0,009}{100} \right) \cdot \text{ВПИ} \cdot t^\circ, \quad (7)$$

где ВПИ (fullscale (fs)) – верхний предел измерения,  $t^\circ$  – температура окружающей среды. При  $\Delta P > 0$  в функцию  $f(t^\circ)$  следует подставить знак «плюс», а при  $\Delta P < 0$  – знак «минус».

Содержание основного блока «CapacitiveDifferentialPressureModule» представлено на рисунке 5. Подмодель, реализующая функцию  $f(t^\circ)$  реализована с использованием типовых

блоков. Место в структуре общей модели представлено на рисунке 6-а, блок задания функции  $f(t^\circ)$  на рисунке 6-б.

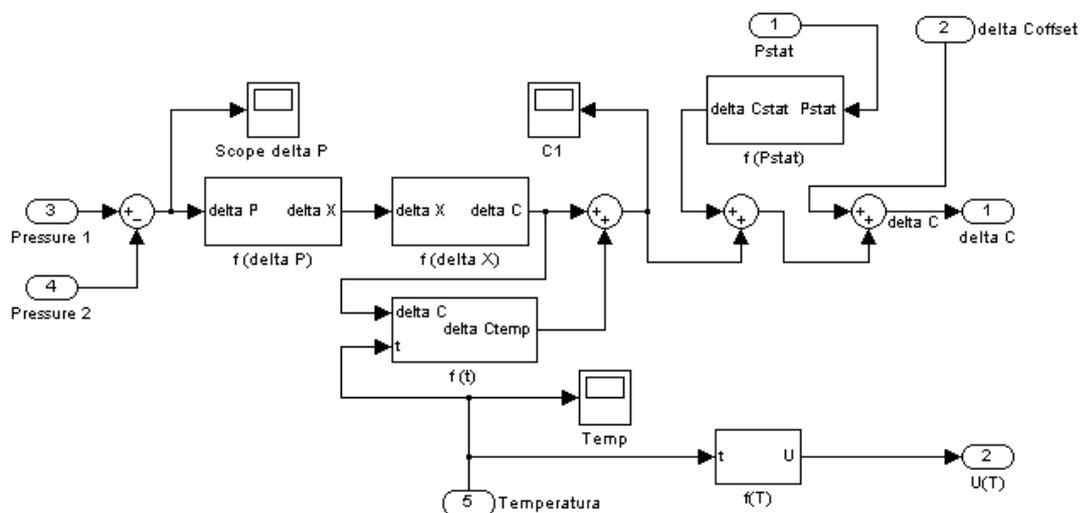


Рисунок 5. Содержание основного блока «CapacitiveDifferentialPressureModule»

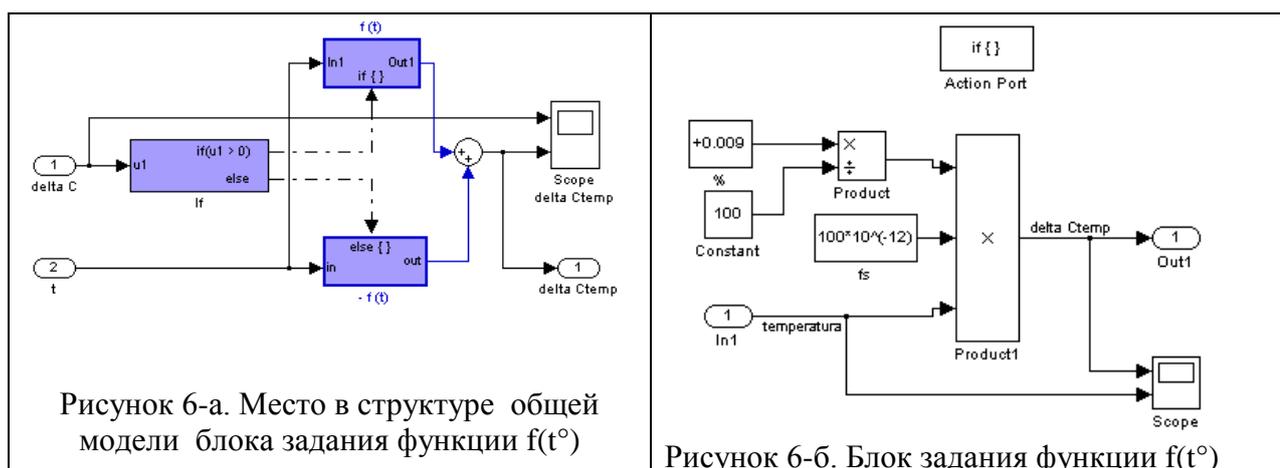


Рисунок 6-а. Место в структуре общей модели блока задания функции  $f(t^\circ)$

Рисунок 6-б. Блок задания функции  $f(t^\circ)$

Для наблюдения за дополнительной температурной погрешностью  $\Delta C_{\text{темпл}}$  выходного сигнала в модели предусмотрен осциллограф «ScoredeltaCtemp».

В результате моделирования получено, что дополнительная температурная погрешность на всем температурном диапазоне изменяется от -0,8 до 0,8 пФ, т.е.  $\pm 0,8\%$  ВПИ.

Влияние статического давления на выходной сигнал емкостной ячейки определяется функцией  $f(P_{\text{стат}})$ . Согласно [7] дополнительная погрешность от воздействия статического давления равна  $\pm 0,25\%$  ВПИ 10 МПа.

$$\Delta C_{\text{СТАТ}} = f(P_{\text{СТАТ}}) = \pm \left( \frac{0,025}{100} \right) \cdot \text{ВПИ} \cdot P_{\text{СТАТ}}, \quad (8)$$

где ВПИ (fullscale (fs)) – верхний предел измерения,  $P_{\text{стат}}$  – статическое давление.

На рисунке 7 представлен блок задания функции  $f(P_{\text{стат}})$  и его содержание.

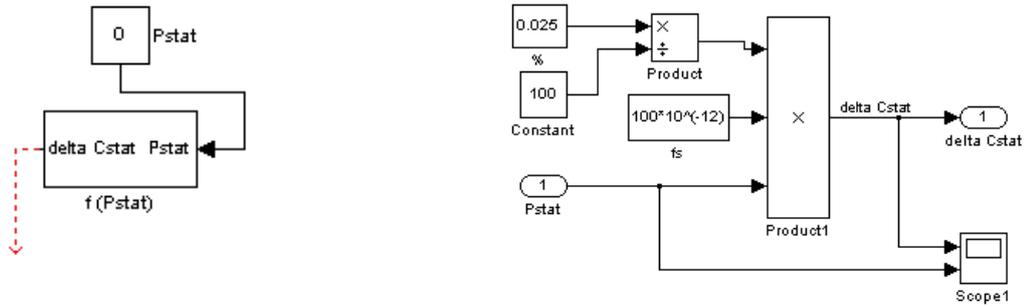


Рисунок 7. Блок задания функции  $f(P_{\text{стат}})$  и его содержание

Смещение нулевого сигнала можно задать с помощью константы  $\Delta C_{\text{offset}}$ . По данным производителя емкостной ячейки 315M-DP максимальное смещение нуля равно  $140 \pm 40$  пФ [7].

На рисунке 8 представлен результат моделирования работы дифференциально-емкостного преобразователя давления 315M-DP, диапазон давлений от -1,5 до 1,5 кПа; значения температур: -30 °С, -5 °С, 20 °С, 45 °С, 70 °С, 85 °С; статическое давление 5 МПа; смещение нуля 50 пФ.

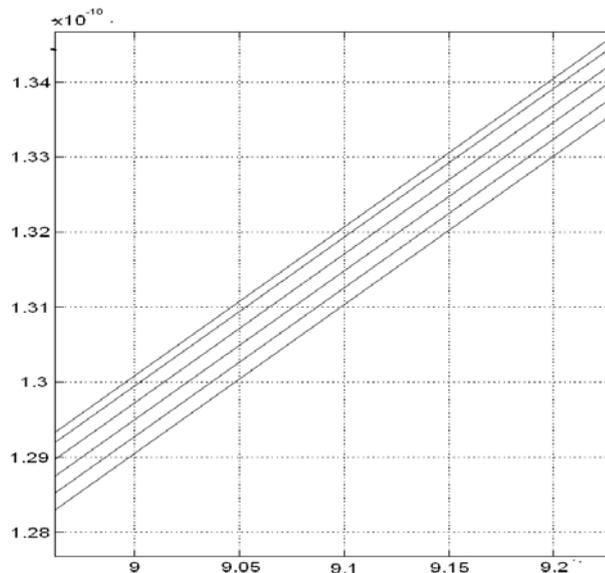


Рисунок 8. Результат моделирования работы дифференциально-емкостного преобразователя давления 315M-DP

В результате расчетов получено, что при воздействии перечисленных выше внешних факторах разброс выходного сигнала равен  $\pm 1$  пФ, т.е.  $\pm 1\%$  ВПИ.

В емкостной ячейке 315M-DP имеется температурный датчик - диод. Характеристика диода представляется следующей зависимостью [9]:

$$I_D = I_s \cdot (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \text{ для } U_D \geq 0, \quad (9)$$

где  $I_D$  - прямой ток диода,  $I_s$  - обратный ток насыщения  $\approx 10^{-12} \dots 10^{-6}$  А,  $U_D$  - прямое падение напряжения на диоде,  $U_T = kT/q$  - температурное напряжение,  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  ВАс/К - постоянная Больцмана,  $q = 1,602 \times 10^{-19}$  Ас - элементарный заряд,  $T$  - температура в кельвинах,  $n \approx 1 \dots 2$  -



Mentor Graphics была разработана схема электрическая принципиальная и печатная плата. Разработка конструкции и поверочные расчеты проведены в среде SolidWorks. Структурная схема макета датчика давления с емкостной ячейкой приведена на рисунке 11.

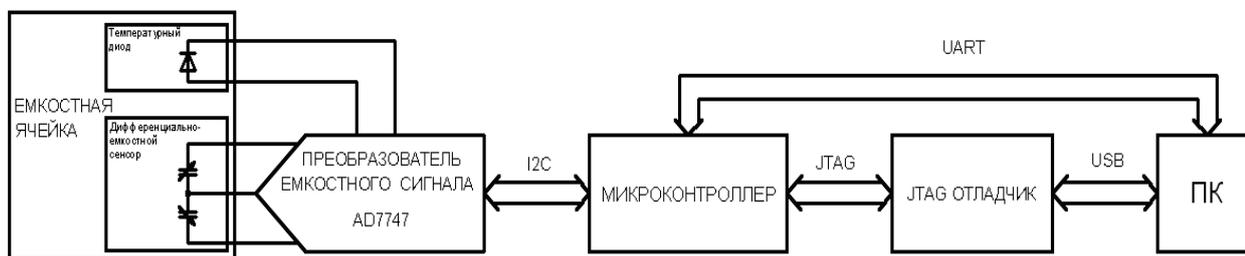


Рисунок 11. Структурная схема макета датчика давления с емкостной ячейкой

Выходной сигнал  $\Delta C$  от емкостной ячейки 315M-DP принимается с помощью микросхемы AD7747, которая является 24-битным  $\Sigma$ - $\Delta$  преобразователем емкость-цифровой код (capacitance to digital converter (CDC)) [8]. Измеряемая емкость подключается непосредственно к выводам микросхемы. Микроконтроллер управляет процессом измерения и передает полученную информацию на персональный компьютер (ПК). Фотография изготовленного макета приведена на рисунке 12.

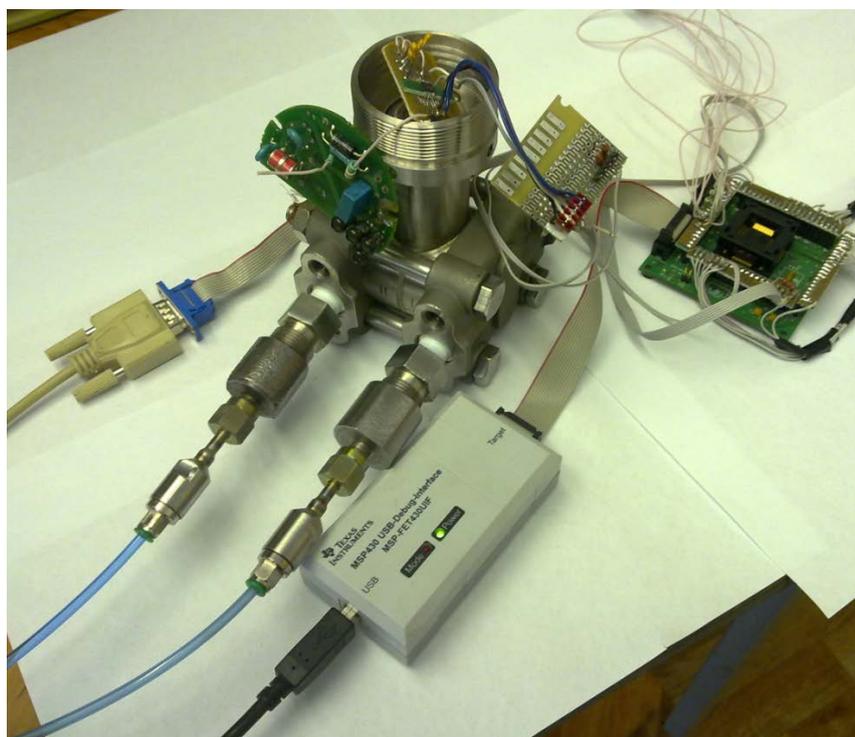


Рисунок 12. Макет датчика давления с емкостной ячейкой 315M-DP

С использованием макета было проведено исследование статической характеристики датчика при воздействующих факторах аналогичных заданным во время проведения компьютерного моделирования в системе MATLAB: диапазон давлений от -1,5 до 1,5 кПа; значения температур: -30 °C, -5 °C, 20 °C, 45 °C, 70 °C, 85 °C; статическое давление отсутствует;

смещение нуля 5 пФ. Температура окружающей среды задавалась в камере тепла и холода. Результаты исследований представлены на рисунке 13.

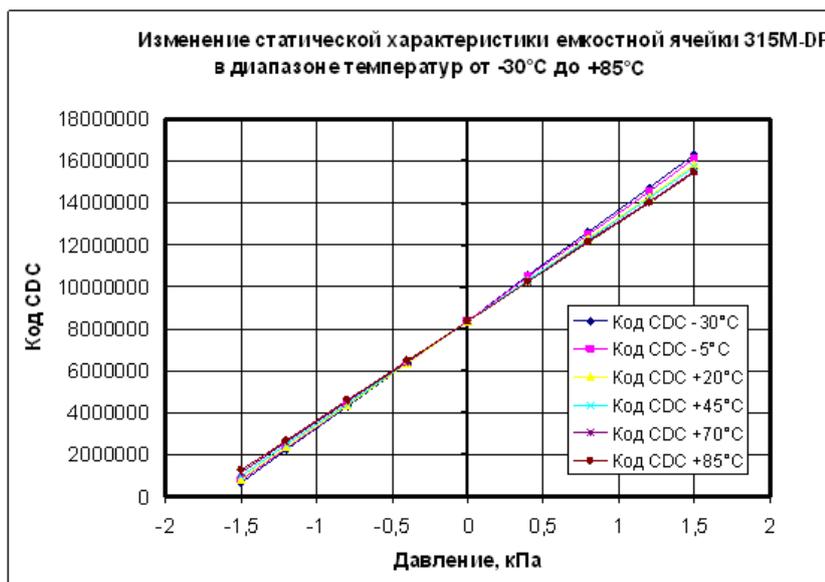


Рисунок 13. Статические характеристики емкостной ячейки 315M-DP с преобразователем AD7747 в диапазоне температур от -30°C до +85°C и диапазоне давлений от -1,5кПа до +1,5кПа

Коду CDC 0 ед. соответствует давление -1,5кПа ( $\Delta C = -100$  пФ), коду CDC 16000000 ед. соответствует давление 1,5кПа ( $\Delta C = +100$  пФ).

К микросхеме AD7747 был подключен температурный датчик дифференциально-емкостного преобразователя 315M-DP. Исследование характеристики преобразования температурного датчика проводилось при изменении температуры окружающей среды от -60 до +85°C, также как и при моделировании. Результаты исследований приведены на рисунке 14.

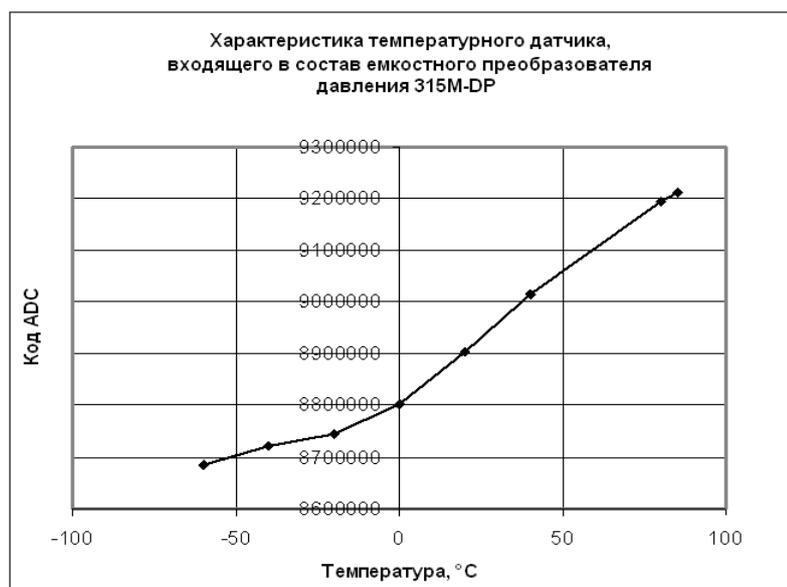


Рисунок 14. Характеристика температурного датчика из состава дифференциально-емкостного преобразователя давления 315M-DP, с преобразователем AD7747 в диапазоне температур от -60°C до +85°C.

В результате исследований макета датчика давления с дифференциально-емкостным преобразователем 315M-DP установлено, что максимальная нелинейность статической характеристики равна 0,3% ВПИ. Рассчитанный разброс выходного сигнала равен  $\pm 2,63\%$  ВПИ. На номинальном диапазоне измерения погрешность измерения  $< 0,1\%$  ВПИ была достигнута при времени преобразования 40 мс.

Проведенное макетирование датчика позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели дифференциально-емкостного датчика давления и верности принятых допущений. Предложенная методика проектирования датчика давления с использованием системы компьютерного моделирования MATLAB позволяет значительно снизить временные затраты, рассматривать несколько альтернативных вариантов создаваемого датчика и прогнозировать результаты проектирования за счёт многократного уточнения результатов, полученных на предшествующих этапах. Модель и результаты моделирования могут быть использованы при проектировании подобных датчиков давления.

#### *Литература:*

1. Щепетов А.Г. Теория, расчет и проектирование измерительных устройств: В 3-х частях: Часть 2. Расчет измерительных устройств. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2007. – 344с.
2. В.П. Дьяконов MATLABR2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. - 800 с.: ил. - (Серия «Библиотека профессионала»).
3. Проектирование систем на микросхемах с программируемой структурой. Р.И. Грушвицкий, А.Х. Мурсаев, Е.П. Угрюмов. - СПб.: БХВ-Петербург, 2006.-736с.
4. Боднер В.А., Алферов А.В. Измерительные приборы: Учебник для вузов: В 2 т. – М.: Изд-во стандартов, 1986
5. Аш Ж. с соавторами. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн.2. Пер. с франц. – М.: Мир, 1992. - 424с., ил.
6. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие для техникумов. – М.: Издательство стандартов, 1990. 287с., ил.
7. Metal Capacitive Differential Pressure Modules. Model 315M. BCM SENSOR TECHNOLOGIES, 2008. -3с.
8. Datasheet Analog Device 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7747 2007-28с.
9. Тутце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I. Пер. с нем. - М.: ДМК Пресс, 2008. - 832 с.: ил.

## Сведения об авторах

Никонов Константин Петрович, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;  
тел.: (499) 158-47-13, 8-926-559-29-61; e-mail: kpnikonov\_88@inbox.ru

ОРЛОВ Валерий Павлович, заведующий кафедрой Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;  
тел.: (499) 158-47-13, 8-916-379-81-99; e-mail: OVP403@ya.ru